

常德市主要饮用水源重金属健康风险评估

万明¹, 张红波^{2*}, 吴海³

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 机电工程学院, 湖南 湘潭 411201;

3. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要:对常德市2016年主要饮用水源地沅江和澧水重金属浓度实时监测数据进行统计研究,运用US EPA推荐的健康风险评估模型对该市主要饮用水源水体中重金属的健康风险进行评价.研究得出,沅江中重金属健康危害的个人年风险:As(致癌物)>Cd(致癌物)>Pb(非致癌物),健康风险值分别为 1.03×10^{-4} , 3.59×10^{-6} , $7.39 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$.澧水中重金属健康风险排序和沅江类似,风险值分别为 1.24×10^{-4} , 4.00×10^{-6} , $7.62 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$.对人体健康的年总风险值略微高于国际辐射防护委员会(ICRP)和美国环境保护局(US EPA)的推荐值 5×10^{-5} 和 $1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$,应该引起相关部门重视.

关键词:饮用水源;重金属;健康风险评估;个人年风险

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2017)04-0073-06

Health Risk Assessment of Heavy Metals in Major Drinking Water Sources in Changde City

Wan Ming¹, Zhang Hongbo², Wu Hai³

(1. School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Key Laboratory on Prevention and Control of Southern Coal Mine Gas and Roof Disaster and Safety Production,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Based on the statistical study of the real-time monitoring data of heavy metal concentration in Yuan River and Li River—the main drinking water sources of Changde City in 2016, the health risk of heavy metals contained in the main drinking water sources of Changde City is evaluated by the health risk assessment model recommended by the US EPA. The study concludes that the personal annual risk of health hazards of heavy metals contained in Yuan River is ranked as As (Carcinogens) > Cd (Carcinogens) > Pb (Non-carcinogens) with a health risk value of 1.03×10^{-4} , 3.59×10^{-6} , $7.39 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$ respectively. The risk of health hazards of heavy metals contained in Li River ranks similarly to that of Yuan River with a health risk value of $1.24 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ for As, $4.00 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ for Cd, $7.62 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$ for Pb. The overall annual health risk for human health is slightly higher than 5×10^{-5} and $1 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ recommended by the ICRP and the US EPA, which should be paid attentions to by the relevant departments.

Keywords: drinking water source; heavy metal; health risk assessment; personal annual risk

重金属作为水质污染物的重要组成部分,其污染特点主要是隐蔽、持久、毒性大、不能被微生物降解,容易通过生物链富集在生物体内,直接或间接危害人类健康.水体中的重金属污染物主要来源于周边矿藏溶蚀、金属矿山开采和冶炼排放以及化工类企业排放等.重金属污染物通过废水的排放、降水径流、受污染

底泥的释放及大气沉降等主要途径进入水体.地表水中微量重金属人体暴露途径主要是饮水和皮肤接触^[1].已确认的危害较大的金属元素有 Tl, Hg, Cd, Pb, As, Cu, Zn, Cr 等^[2].其中, As, Cd, Cr 是公认的致癌物^[3].长期暴露在 As 环境下会对人体皮肤、血液循环、神经系统产生不良影响,严重的甚至会诱发肝癌、皮肤癌等,属于目前环境中最为普遍、危害最大的毒害性物质之一^[4].Cd 会干扰人的雌激素分泌,主要积蓄在动物和人体的肾脏和肝脏中,不易被人体自身清除,有研究表明 Cd 在人体骨骼中的滞留半衰期可达 38 a^[5].Pb 会影响婴幼儿身体和智力发育,干扰人体生殖腺的分泌^[6],损伤肾脏,危害机体造血功能,引起高血压、免疫低下、消化系统紊乱等.

湖南省素有“有色金属之乡”的美誉,重金属污染较重,Hg, Cd, Pb, As 等排放十分突出^[7].流经常德市境内的沅江和澧水是沿线各县市的主要饮用水源,其水质状况对两岸居民的身体健康具有直接的影响.本文运用美国环保署(US EPA)推荐的健康风险评估模型对该市饮用水源中的重金属健康风险展开评价,明确了饮用水源中将会威胁人体健康的污染因子的污染程度,为该区域的水污染治理和环境保护提供科学依据.

1 材料和方法

1.1 区域概况

常德市位于湖南省的西北部,地处中亚热带湿润季风气候向北亚热带湿润季风气候过渡的地带.四季变化明显,年平均气温 16.7 ℃,年降水量 1 200~1 900 mm.每年 3 月至 8 月为多雨的季节,期间雨量占全年雨量的 70%以上.常德市境内主要河流有沅江和澧水,是沿河流周边各县市城区的自来水公司的主要取水源.沅江发源于贵州省东南部,流贯 21 个县市,流域面积约 89 160 km²,干流全长约 1 020 km,是湖南省第二大河流.在常德市境途经桃源县、常德市区、汉寿县,最后于坡头注入洞庭湖.水文常德站平均水位 29.1 m³,年平均输水量 656.4×10⁸ m³,水量充沛.澧水跨越湘鄂两省边境,干流分北、中、南三源,以北源为主,三源于桑植县打谷泉与桥子湾的小茅岩汇合后东流,沿途接纳溇水、澱水、道水和涇水等支流,至澧县小渡口注入洞庭湖,多年平均径流量 131.2×10⁸ m³,流域面积 18 496 km²,其中湖南境内 15 736 km²,年径流总量(三江口站)131.2×10⁸ m³,在常德市境内途径石门、临澧、澧县、津市等县(市).

1.2 数据来源

对常德市的主要饮用水源地——沅江、澧水进行水质数据采集,湖南省环保厅在常德市境内共设 2 个地表水水质自动监测站,监测站点位置分布详见图 1 所示,图片引用于湖南省环保厅地表水水质自动监测系统(<http://www.hncems.cn:100/publishedRealData.aspx>).一处是位于怀化市与常德市交界地带附近的桃源观音寺水质监测断面;另一处是位于张家界市与常德市的交界地带附近的石门新关水质监测断面.距离沅江桃源观音寺地表水自动监测站下游大约 70 和 120 km 处分别分布有桃源县和常德市区自来水公司的取水点.地表水水质自动监测站 24 h 实时监控水质变动情况,统计了 2016 年内 52 组周统计数据,监测评价项目分别是水质 pH 值,DO(溶解氧),CODMn(高锰酸盐指数),NH₃-N(氨氮),TP(总磷),As(砷),Cd(镉),Pb(铅).本文主要统计了监测数据中的 As(砷)、Cd(镉)、Pb(铅)3 种重金属进行分析.

1.3 健康风险评估模型

健康风险评估是采用统一的危害指标来定量描述各种污染物对人体健康危害的方法,包括各类污染物的危害鉴别、污染物的剂量效应关系评价、人体暴露评价和健康风险表征 4 个步骤^[8].该评价方法兴起于 20 世纪 80 年代,我国从 20 世纪 90 年代开始引用^[9],目前关于人体健康的水质评价大多引用或参照国外的方法.饮用水中的重金属污染物通过饮水途径进入人体后,对人体健康的影响主要有化学致癌物(基因毒性物质)健康风险和非致癌物(躯干毒性物质)健康风险,风险计算模型分别为式(1)~式(2).

$$R^c = \sum_{i=1}^k R_{ig}^c = \sum_{i=1}^k [1 - \exp(-D_{ig}q_{ig})] / 76.1; \quad (1)$$

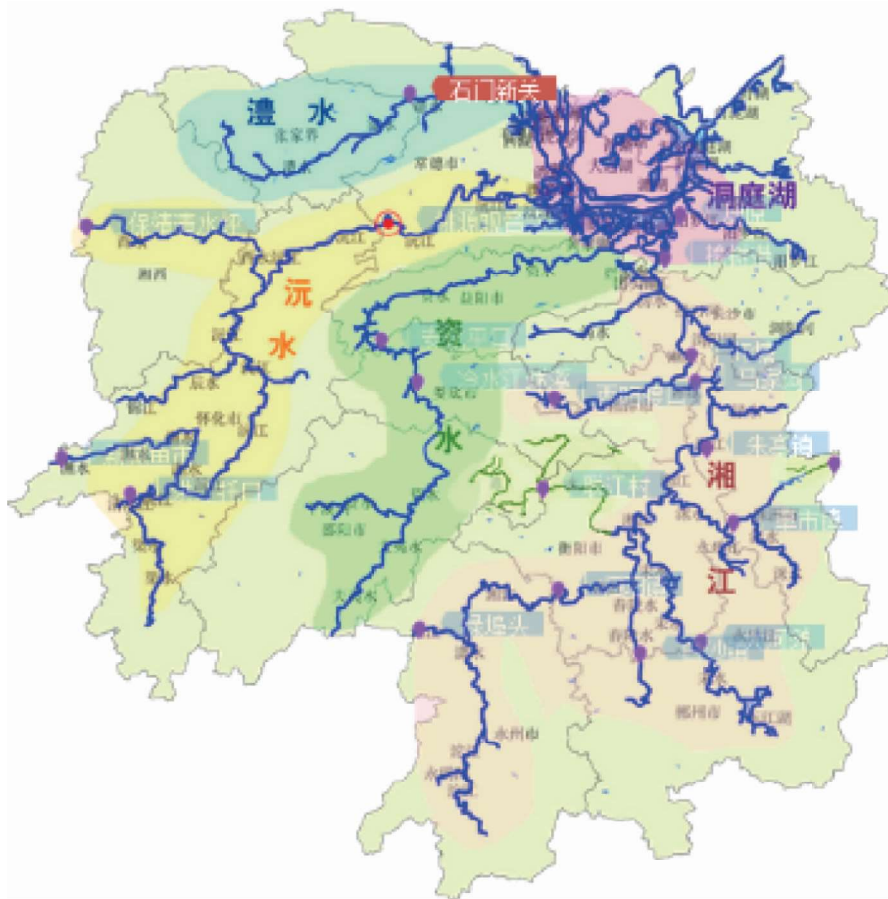


图1 监测点位置分布

$$R^n = \sum_{i=1}^l R_{ig}^n = (D'_{ig} \times 10^{-6} / RfD'_{ig}) / 76.1. \quad (2)$$

式中: R_{ig}^c 为化学致癌物 i (共 k 种化学致癌物质) 经食入途径产生的平均个人致癌年风险, a^{-1} ; D_{ig} 为化学致癌物 i 经食入途径的单位体重日均暴露剂量, $mg/(kg \cdot d)$; q_{ig} 为化学致癌物 i 经食入途径致癌强度系数, $(mg/(kg \cdot d))^{-1}$; R_{ig}^n 为非致癌物质 i (共 1 种非致癌物质) 经食入途径所致健康危害的个人平均年风险, a^{-1} ; D'_{ig} 为非致癌物 i 经食入途径的单位体重日均暴露剂量, $mg/(kg \cdot d)$; RfD'_{ig} 为非致癌污染物 i 的食入途径参考剂量, $mg/(kg \cdot d)$; 76.1 为《2016 世界卫生统计报告》统计的中国人均寿命, a.

重金属通过居民饮用水途径对人体的日均暴露剂量 D_{ig} (D'_{ig}) 可按下式进行计算:

$$D_{ig} = D'_{ig} = 2.2 \times \Delta C_i(x) / 60.57. \quad (3)$$

式中: 2.2 为成年人平均每日饮水量, L; $\Delta C_i(x)$ 为年均浓度增量, $(mg \cdot L^{-1})$; 60.57 为《中国居民营养与慢性病状况报告(2015)》统计的湖南人均体重, kg.

由于对人体健康产生危害的因子较多, 假定各类危害因子间不存在拮抗或协同关系, 则在该评价模型中, 重金属通过饮用水途径对人体产生的总健康风险为各单独危害作用的累加, 即为

$$R_{总} = R^c + R^n. \quad (4)$$

1.4 确定评价污染因子和参数

由于各监测站的监测数据是依据国家标准和当地的水文特征以及监测站的人员、设备等实际情况来制定监测项目, 本文选取常德市当地的监测结果中的 As, Cd, Pb 这 3 种重金属进行评价, 依据国际癌症研究机构 (IARC) 和世界卫生组织 (WHO) 编制的分类系统, As 和 Cd 为化学致癌物质, Pb 为非致癌物质, 相关参考计量值见表 1. 关于重金属通过饮用水途径对人类产生的健康风险极限值, 不同的机构结合本地区

实际情况提出了相应的推荐标准,详见表2.

表1 致癌强度系数($\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$)和非致癌参考剂量 $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$

评价因子	q_{ig}	R/D'_{ig}
As	15	-
Cd	6.1	-
Pb	-	0.001 4

表2 国际上部分机构推荐的健康风险极限值

机构	最大可接受风险水平	可忽略风险水平	备注
美国环境保护署(US EPA)	1×10^{-4}	-	辐射
国际辐射防护委员会(ICRP)	5×10^{-5}	-	-
英国皇家协会	1×10^{-6}	1×10^{-8}	-
荷兰建设和环境部	1×10^{-6}	1×10^{-8}	化学污染物
瑞典环境保护局	1×10^{-6}	-	化学污染物

2 结果与讨论

2.1 水体中重金属含量状况

水体中重金属含量状况见表3.从总体上来看,桃源观音寺断面和石门新关断面水体 As, Cd, Pb 的平均浓度均达到Ⅱ类水标准(GB3838-2002).但澧水石门新关断面3种重金属年平均浓度值均高于沅江桃源观音寺断面,高出幅度为 As(19.2%↑), Cd(12.0%↑), Pb(3.4%↑).分别来看,沅江桃源观音寺断面水体中 Cd 的年平均浓度达到Ⅱ类水标准,部分时段保持Ⅰ类水标准,全年未超过Ⅱ类水标准上限;Pb 的年平均浓度达到Ⅰ类水标准,个别时段超过Ⅱ类上限达到Ⅲ类水标准;As 的浓度全年保持Ⅰ类水标准内.沅江桃源观音寺站水体重金属月均浓度分布详见图2. Cd, Pb 月平均浓度变化不大, As 浓度变化较大.5~7月重金属总浓度较高,分别是 0.031 4, 0.027 2, 0.031 3 mg/L, 其中 As 浓度值为 0.023 5(占比 74.8%), 0.019 3(占比 70.9%), 0.022 6(占比 72.2%) mg/L.澧水石门新关断面水体中 Cd 的年平均浓度达到Ⅱ类水标准,部分时段保持Ⅰ类水标准,全年未超过Ⅱ类水标准上限;Pb 的年平均浓度达到Ⅰ类水标准,个别时段超过Ⅱ类上限达到Ⅲ类水标准;As 的浓度全年保持Ⅰ类水标准内.澧水石门新关站水体重金属月均浓度分布详见图3. Cd, Pb 月平均浓度变化不大, As 浓度变化较大.4月, 7月, 11月重金属总浓度较高,分别是 0.035 0, 0.031 2, 0.035 3 mg/L, 期中 As 浓度值为 0.023 8(占比 68.0%), 0.022 8(占比 73.0%), 0.027 0(占比 76.4%) mg/L.沅江和澧水上游的怀化, 张家界等市, 主要农作物是水稻, 春夏两季都是农药使用的高频季节, 加上上游的金矿、河道采砂船较多, 可能与水体中重金属浓度变化有关.

表3 常德市主要水源地水体中重金属浓度($n=52$)

监测点	数据类型	重金属浓度/(mg/L)		
		As(致癌物)	Cd(致癌物)	Pb(非致癌物)
桃源观音寺 (沅江)	最小值	0.004 00	0.001 00*	0.006 30
	最大值	0.031 00	0.002 30	0.010 60
	平均值	0.014 98	0.001 25	0.007 87
石门新关 (澧水)	最小值	0.007 00	0.001 00*	0.007 00
	最大值	0.037 00	0.002 50	0.010 70
	平均值	0.017 85	0.001 40	0.008 14
地表水环境质量标准 GB3838-2002	Ⅰ类	0.050 00	0.001 00	0.010 00
	Ⅱ类	0.050 00	0.005 00	0.010 00
	Ⅲ类	0.050 00	0.005 00	0.050 00
	Ⅳ类	0.100 00	0.005 00	0.050 00
	Ⅴ类	0.100 00	0.010 00	0.100 00

注:“*”表示监测低于最小示数,统计时按最低检出限的1/2参加计算(依照《水环境监测规范》(SL219-98)规定)



图 2 沅江桃源观音寺站水体重金属月均浓度分布

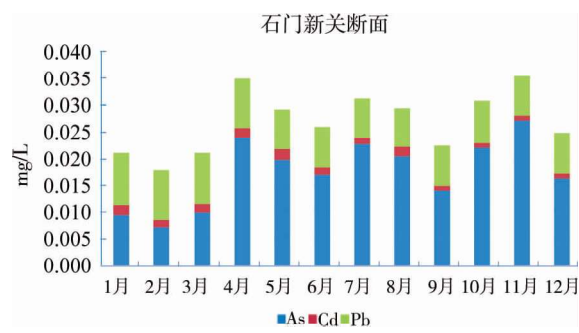


图 3 澧水石门新关站水体重金属月均浓度分布

2.2 水体重金属健康风险评价结果

通过健康风险评价模型分析计算,得出各项污染因子致癌风险结果,详见表 4.由表 4 可知,沅江断面水体中 As 和 Cd 通过饮用水途径引起的致癌风险平均值分别为 1.07×10^{-4} , $3.64 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$, Pb 非致癌物质健康风险值为 $7.39 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$, 风险等级 $\text{As} > \text{Cd} > \text{Pb}$, 总健康风险值为 $1.14 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$, 即每年每 1 万人口中大约有 1.14 人因饮用水中的 As, Cd, Pb 这 3 种重金属污染而引起身体健康问题或者死亡.澧水断面水体中 As 和 Cd 通过饮用水途径引起的致癌风险平均值分别为 1.27×10^{-4} , $4.08 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$, Pb 非致癌物质健康风险值为 $7.64 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$, 风险等级顺序与沅江断面类似, 总健康风险值为 $1.31 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$, 即每年每 1 万人口中大约有 1.31 人因饮用水中的 As, Cd, Pb 这 3 种重金属污染而引起身体健康问题或者死亡, 高于沅江断面饮用水源水体健康风险. 综上, 常德市主要饮用水源地水体中 As 的健康风险都达到了 10^{-4} a^{-1} , 远高于 Cd 和 Pb 的健康风险值, 表明 As 是常德市饮用水源地的主要致癌因子, 相关部门应该做好 As 污染的主要防治对策.

表 4 主要致癌物质与非致癌物质通过饮用水途径产生的总风险

a^{-1}

监测点	数据类型	重金属浓度健康风险			总健康风险
		As(致癌物)	Cd(致癌物)	Pb(非致癌物)	
桃源观音寺 (沅江)	最小值	2.86×10^{-5}	2.91×10^{-6}	5.91×10^{-8}	3.16×10^{-5}
	最大值	2.20×10^{-4}	6.69×10^{-6}	9.95×10^{-8}	2.27×10^{-4}
	平均值	1.07×10^{-4}	3.64×10^{-6}	7.39×10^{-8}	1.14×10^{-4}
石门新关 (澧水)	最小值	5.00×10^{-5}	2.91×10^{-6}	6.57×10^{-8}	5.30×10^{-5}
	最大值	2.62×10^{-4}	7.28×10^{-6}	1.00×10^{-7}	2.70×10^{-4}
	平均值	1.27×10^{-4}	4.08×10^{-6}	7.64×10^{-8}	1.13×10^{-4}

2.3 讨论

与其他区域饮用水源地 As, Cd, Pb 这 3 种重金属总健康风险对比, 除西江, 北江, 东江广州段重金属浓度和某市总体数量级差类似外, 其他地区均比某市低 1~2 个数量级. 对比区域总风险值排序依次为 $\text{As} > \text{Cd} > \text{Pb}$, 并且致癌物质 As, Cd 的健康风险平均值高出非致癌物质 Pb 的 $10^2 \sim 10^6$ 倍. 表明本文运用健康风险评价模型得出的结果与其他同类研究结果基本一致, 其他区域致癌物质 As, Cd 与非致癌物质 Pb 通过饮用水途径产生的总风险详见表 5.

需要指出的是, 本研究结果仅说明了沅江和澧水在常德市境内源头水体中重金属含量状况, 并不代表中下游各市县城区自来水公司取水点中的重金属含量状况. 另外本研究健康风险评价结果存在一定的不确定性, 主要来自于: (1) 本研究只选取 3 种典型重金属元素进行分析; (2) 除了考虑饮用水这一暴露途径外并没有考虑呼吸、食物摄入、皮肤接触等途径; (3) 饮水途径产生的风险与年龄、性别、个人生活习惯和从事的职业有关; (4) 重金属污染分布的时间、季节、区域的不确定性. 因此, 本研究对常德市饮用水源地的健康风险评价是初步的, 还需要进一步的研究. 接下来的工作应关注中下游各市县城区自来水公司取水点附近的重金属健康风险情况, 弄清本区域内重金属浓度变更的机理以及健康风险评价的不确定研究.

表5 其他区域水源地重金属 As, Cd, Pb 通过饮用水途径产生的总风险

a⁻¹

监测点	年份	重金属浓度健康风险			总健康风险	文献
		As(致癌物)	Cd(致癌物)	Pb(非致癌物)		
重庆嘉陵江	2011	1.26×10^{-5}	6.86×10^{-6}	3.00×10^{-10}	1.95×10^{-5}	[10]
长江武汉段	2011	2.13×10^{-5}	2.79×10^{-7}	1.78×10^{-9}	2.16×10^{-5}	[11]
湘江长株潭段	2016	3.05×10^{-5}	-	4.88×10^{-8}	3.05×10^{-5}	[12]
西江北江东江广州段	2005~2008	9.13×10^{-5}	1.08×10^{-5}	2.18×10^{-8}	1.02×10^{-4}	[3]
第二松花江干流	2004	6.73×10^{-6}	2.74×10^{-7}	3.21×10^{-10}	7.00×10^{-6}	[13]
清远市某工业区周边河流	2013	1.42×10^{-6}	8.24×10^{-8}	5.41×10^{-9}	1.51×10^{-6}	[14]
上海成行水库	2006	3.32×10^{-5}	4.00×10^{-7}	3.00×10^{-11}	3.36×10^{-5}	[15]
某部队自用井水	2013	4.63×10^{-6}	2.51×10^{-8}	4.96×10^{-11}	4.66×10^{-6}	[16]

注：“-”表示论文中未监测或未分析相关数据

3 结论

1) 常德市主要饮用水源中,沅江、澧水的水质基本上能够满足国家地表水质量标准,均维持在Ⅱ类、Ⅲ类之间.本文研究的3种重金属元素中As的浓度值最高,一年当中浓度变化值最大,是常德市主要饮用水源污染防治的主要危害因子.

2) 沅江、澧水水体中重金属健康风险等级为As>Cd>Pb,其中致癌物As、Cd的健康风险平均值超出非致癌物质Pb的10²到10⁴倍.致癌物As的最大值已超过国际辐射防护委员会(ICRP)和美国环境保护局(US EPA)的推荐的最大可接受限值水平.非致癌物质Pb的健康风险也超出了ICRP和US EPA推荐的可忽略的限制,应该引起相关决策者重视.

3) 澧水水体的总潜在致癌风险要高于沅江水体,并且澧水水体的主要危害重金属As浓度每月分布规律变化不稳定,应该加强相关流域重金属污染的管理工作.

参考文献:

- [1] Giri S, Singh A K. Risk assessment, statistical source identification and seasonal fluctuation of dissolved metals in the Subarnarekha River, India[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 265: 305-314.
- [2] 廖国礼.典型有色矿山重金属迁移规律与污染评价研究[D].长沙:中南大学,2005:1-3.
- [3] 李祥平,齐剑英,陈永亨.广州市主要饮用水源中重金属健康风险的初步评价[J].环境科学学报,2011,31(3):547-553.
- [4] Chappell W R, Beek B D, Brown K G, et al. Inorganic arsenic: a need and an opportunity to improve risk assessment[J]. Environmental Health Perspect, 1997, 105: 1060-1067.
- [5] Berman E. Toxic Metals and Their Analysis[R]. Philadelphia, PA: Heyden and Son, Ltd, 1980.
- [6] 任仁,黄俊.哪些物质属于内分泌干扰物(EDCs)[J].安全与环境工程,2004,11(3):7210.
- [7] 周志华.湖南矿山环境现状分析与治理对策研究[J].矿业工程研究,2009,24(3):57-60.
- [8] 李丽娜.上海市多介质环境中持久性毒害污染物的健康风险评价[D].上海:华东师范大学,2007.
- [9] 李二平,侯嵩,孙胜杰,等.水质风险评价在跨界水污染预警体系中的应用[J].哈尔滨工业大学学报,2010(6):963-966.
- [10] 刘跃晨,王云,吴树宝,等.重庆嘉陵江干流饮用水源地水质分析与健康风险评价[J].水文,2013(3):91-96.
- [11] 杜维,李爱民,鲁敏,等.长江武汉段水质重金属健康风险初步评价[J].环境科学与技术,2014(s2):535-539.
- [12] 曹文杰.基于人体健康的湘江砷、铅水质基准研究[D].湘潭:湘潭大学,2016.
- [13] 苏伟,刘景双,王洋.第二松花江干流水环境健康风险评价[J].自然资源学报,2007(1):79-85.
- [14] 何健飞,王国彬,赖婧.清远市某工业区农村饮用水重金属健康风险评价[J].中国卫生检验杂志,2014(23):3460-3462.
- [15] 孙超,陈振楼,张翠,等.上海市主要饮用水源地水重金属健康风险初步评价[J].环境科学研究,2009(1):60-65.
- [16] 王中民,田葆萍,王盟,等.某部自备井饮用水中重金属对健康风险的评价[J].中国预防医学杂志,2015(7):572-574.